



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 42 15 797 A 1**

⑳ Aktenzeichen: P 42 15 797.8  
㉑ Anmeldetag: 13. 5. 92  
㉒ Offenlegungstag: 25. 11. 93

㉓ Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**H 01 S 3/105**  
H 01 S 3/08  
H 01 S 3/042  
H 01 S 3/025  
G 12 B 5/00  
H 01 L 41/09  
G 02 B 26/00

DE 42 15 797 A 1

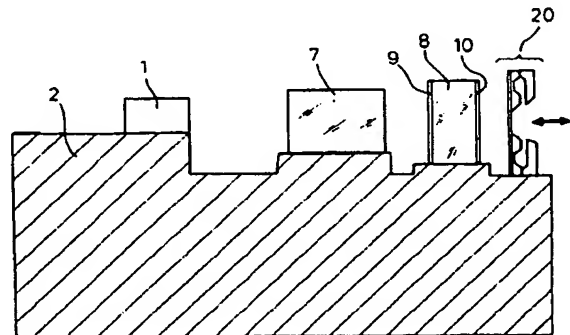
㉔ Anmelder:  
Deutsche Aerospace AG, 80804 München, DE

㉕ Erfinder:  
Heinemann, Stefan, Dipl.-Phys., 8000 München, DE;  
Kroy, Walter, Dipl.-Phys. Dr., 8012 Ottobrunn, DE;  
Mehnert, Axel, Dipl.-Ing., 8920 Schongau, DE;  
Peuser, Peter, Dr., 8012 Riemerling, DE; Schmitt,  
Nikolaus, Dipl.-Phys., 8000 München, DE; Seidel,  
Helmut, Dipl.-Phys. Dr., 8130 Starnberg, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉖ Lasersystem mit mikromechanisch bewegten Spiegel

㉗ Die Erfindung bezieht sich auf ein Lasersystem mit einem oder mehreren aktiv kontrollierten Laserspiegeln, die mikromechanisch hergestellt und mit einer Manipulationsvorrichtung versehen ist, so daß eine schnelle Modulation von kleinen Laserspiegeln gewährleistet ist und diese Spiegel so konzipiert sind, daß sie eine wirtschaftliche Fertigung in großen Stückzahlen erlauben. Ausführungsbeispiele sind erläutert und in den Figuren der Zeichnung skizziert.



DE 42 15 797 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 09. 93 308 047/27

10/53

Die Erfindung bezieht sich auf ein Lasersystem mit einem oder mehreren aktiv kontrollierten Laserspiegeln gemäß dem Gattungsbegriff des Anspruchs 1.

Solche Lasersysteme sind aus dem Stand der Technik bekannt. Sie beruhen im wesentlichen auf der Verwendung elektrostriktiver Materialien, wie etwa Piezokeramiken zur Bewegung von Laserspiegeln. Solche Piezoaktuatoren sind jedoch mit erheblichen Nachteilen behaftet, denn die Piezokeramiken sind nicht hysteresefrei und zum anderen benötigen sie üblicherweise zur Ansteuerung eine Hochspannung und zum dritten ist die Integration und Bearbeitung von Keramikelementen bei der Herstellung solcher Lasersysteme relativ aufwendig.

Wesentliche Manipulationsgrößen sind hierbei etwa die Verkipfung des Spiegels oder die Translation entlang der optischen Achse. Zum einen verlangen diese bekannten Systeme die Integration sehr unterschiedlicher Materialien, so daß eine monolithische Fertigung ausgeschlossen ist, zum anderen weisen Piezokeramiken Nachteile bezüglich ihrer mechanischen Abmessung und der notwendigen hohen Spannungen auf. Hinzu kommt noch, daß Piezokeramiken Resonanzfrequenzen im Bereich von typisch 100 kHz aufweisen, so daß eine Modulation von Piezokeramiken über diesen Frequenzwert hinaus nicht oder nur sehr schwer möglich ist. Zu erwähnen ist noch, daß bereits bei Modulationen im Bereich der Resonanzfrequenz im allgemeinen eine Selbstzerstörung der Keramikstruktur auftritt.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Lasersystem der eingangs genannten Art zu schaffen, das eine schnelle Modulation von kleinen Laserspiegeln erlaubt, wobei diese Spiegel so konzipiert sind, daß sie eine wirtschaftliche Fertigung in großen Stückzahlen erlauben.

Diese Aufgabe wird durch die im Anspruch 1 angezeigten Maßnahmen gelöst. In den Unteransprüchen sind Ausgestaltungen und Weiterbildungen angegeben und in der nachfolgenden Beschreibung sind Ausführungsbeispiele erläutert und in den Figuren der Zeichnung skizziert. Es zeigen

Fig. 1 ein Schemabild eines Ausführungsbeispiels für einen Halbleiterlaser mit mikromechanisch gehaltertem Spiegel zur schnellen Frequenzmodulation,

Fig. 2 ein Schemabild eines Ausführungsbeispiels für einen diodengepumpten Festkörperlaser mit mikromechanisch gehaltertem Spiegel zur schnellen Frequenzmodulation,

Fig. 3 ein Schemabild einer Ausführungsform eines mikromechanisch gehalterten Laserspiegels mit einem Glasplättchen als Spiegelsubstrat,

Fig. 4 ein Schemabild einer Ausführungsform für einen mikromechanisch gehalterten Laserspiegel in der Draufsicht, wobei der dielektrische Spiegel ohne Spiegelsubstrat hergestellt ist,

Fig. 5 eine Ausschnittsskizze zur Verdeutlichung der mikromechanischen Manipulationsvorrichtungen des Laserspiegels in Aufsicht, wobei die Bewegung senkrecht hierzu erfolgt,

Fig. 6 eine weitere Ausschnittsskizze zum Aufbau einer mikromechanischen Manipulationsvorrichtung,

Fig. 7 ein Schemabild einer weiteren Ausführungsform eines mikromechanisch gehalterten Laserspiegels in der Ebene des Substrates mit Elementen zur Strahlumlenkung (sog. "gefalteter Resonator"), wobei mehrere Lasersysteme flächenmäßig angeordnet sind.

Die Laserspiegel nach dem Stand der Technik sind allgemein sehr viel größer, als die sonstigen Elemente des Lasers und müssen außerdem einzeln optisch poliert und beschichtet sowie mechanisch gehaltert werden. In dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 wird ein mikromechanisch hergestellter, bewegbarer Spiegel 20 verwendet, welcher zum einen flächen- und volumenmäßig nicht wesentlich größer ist als die hier eingezeichnete Laserdiode 1, zum anderen in großen Stückzahlen in herkömmlicher Wafertechnologie gefertigt und außerdem auch noch bei geeigneter Ausformung bewegbar angeordnet werden kann. Auf die detaillierte Beschreibung bzw. Ausgestaltung dieses Spiegels 20 wird bei der Beschreibung der Fig. 5 und 6 eingegangen, in diesem Anwendungsfall kann der Spiegel in longitudinaler Richtung ausgelenkt werden, so daß hierdurch die Resonatorlänge aktiv einstellbar ist, was in einer Frequenzmodulation der Laserstrahlung resultiert.

In gleicher Anordnung kann der Laser ein- und ausgeschaltet oder auch gütegeschaltet werden, wenn der Laserspiegel so ausgeformt ist, daß eine Verkipfung der Spiegelfläche relativ zur Fläche 7 des Halbleiterlasers bzw. der Halbleiter-Laserdiode 1 durch mikromechanische Ansteuerung erfolgt. Problemlos können solche Spiegel 20, die eine verminderte Fertigungsgenauigkeit aufweisen, montiert werden, wenn durch mikromechanische Ansteuerung des Spiegels 20 nach der Montage, letzterer einjustiert und anschließend fixiert wird. Nähere Erläuterungen hierzu werden nachfolgend — um Wiederholungen zu vermeiden — in der Beschreibung zu den Fig. 5 und 6 gegeben.

Die Fig. 2 veranschaulicht in analoger Weise einen durch Laserdioden gepumpten Festkörperlaser mit der vorgeschlagenen Spiegelanordnung 20, welche dieselben Eigenschaften wie beschrieben aufweist. Bei diesem Ausführungsbeispiel werden hier alle Elemente des Lasers, welche ähnliche mechanische Abmessungen aufweisen, wie die Spiegelanordnung 20, auf einer gemeinsamen Basis montiert werden. Der Halbleiterlaser 1 ist auf einer Wärmesenke 2 montiert. Die Laserstrahlung wird über eine Ankoppeloptik 7 in einen Festkörperlaserkristall 8 — z. B. Nd : YAG — fokussiert, dessen eine Stirnseite beispielsweise mit einem Coating 9 versehen ist, welches hochtransmittierend für die Laserdiodenstrahlung und hochreflektierend für die Festkörperlaserstrahlung ist. Das Coating 10 ist antireflektierend für die Festkörperlaserstrahlung, so daß sich zwischen Spiegelschicht 9 und der Beschichtung des mikromechanischen Spiegels 20 ein Laserresonator für die Festkörperlaserstrahlung ausbildet. Die Eigenschaften des Frequenzmodulierens, An- und Ausschaltens sowie das Güteschaltens sind hier ebenso gegeben, wie eine aktive Justage des Spiegels 20.

In der Fig. 3 ist eine Ausführungsform eines mikromechanischen Laserspiegels skizziert, der aus einem anisotrop geätzten Halbleitersubstrat 51 besteht, welches mit einem Spiegelsubstrat 52 kontaktiert ist. Das Spiegelsubstrat 52 ist einseitig mit einer teilreflektierenden Spiegelschicht 53 und rückseitig mit einer Antireflexschicht 54 für die Laserwellenlänge beschichtet.

In der Fig. 4 ist eine Spiegelausführung mit sogenannter frei schwebender Spiegelschicht ohne Substrat gezeigt, wie sie Gegenstand einer gleichlaufenden Anmeldung ist. Diese Ausführungsform kann auch im hier vorliegenden Falle gut eingesetzt werden, da durch Weglassen des Substrates 52 ein besonders einfacher Aufbau und eine geringe bewegte Masse realisiert werden kann.

Die Fig. 5 und 6 veranschaulichen den detaillierten

Aufbau des Spiegels, wie er in den Anordnungen gemäß den Fig. 1 und 2 verwendet wird. Hierbei zeigt die Fig. 5 diesen Spiegel in einer Aufsicht. Siliziumsubstrate können beispielsweise so geätzt werden, daß an beweglichen Aufhängelaschen eine kleine Siliziumfläche befestigt ist, welche entweder das Spiegelsubstrat gemäß Fig. 3 trägt, oder aber eine frei schwebende Spiegelschicht gemäß Fig. 4 ist. Aufgrund der elastischen Aufhängung kann diese Siliziumfläche nun je nach Anordnung und Ansteuerung durch die Aktuatoren, überall translatiert oder verkippt werden. Das in Fig. 5 skizzierte Ausführungsbeispiel zeigt eine Anordnung für parallele Auslenkung, beispielsweise zur Frequenzmodulation des verwendeten Lasers. In diesem Fall kann z. B. eine hochgradig symmetrische, diagonale Anordnung der Biegebalken gewählt werden. Die Gegenelektrode am unteren Deckwafer ist hierbei nicht unterteilt. In einer leichten Abwandlung ergibt sich nach dem gleichen Prinzip eine Anordnung, die sich für Kippbewegungen des Spiegels eignet, beispielsweise um eine Güteschaltung des Laserresonators oder eine Justage des Spiegelementes zu realisieren. Die Aufhängung kann hierbei in Form zweier Torsionsbalken gewählt werden. In diesem Falle werden die Elektrodenflächen in zwei getrennte Hälften geteilt, die unabhängig voneinander angesteuert werden.

Die Fig. 6 zeigt diesen Spiegel im Schnitt und verdeutlicht die Ansteuerung und den Aufbau der Aktoren. Es ist deutlich erkennbar, daß zwischen den elastischen Aufhängebalken und der Spiegelschicht je eine Elektrode am oberen Wafer angeordnet ist, welche über einen Luftspalt getrennt einer Gegenelektrode gegenüberliegt. Werden Ladungen auf die Elektroden aufgebracht, so führt dies je nach dem Ladungsvorzeichen zu einer Anziehung oder Abstoßung der Elektroden und somit — je nach Ansteuerung der Gesamtheit der Elektroden und der Anordnung der Biegebalken, zu einer translatorischen Bewegung oder zu einer Verkipfung der Spiegel. Wird auf jeweils alle Elektroden und Gegenelektroden jeweils dieselbe Ladung aufgebracht, so ergibt sich eine gleichförmige Translation. Ist die Ladung unterschiedlich, so ergibt sich eine Verkipfung. Insbesondere bei einer Konzeption mit Torsionsbalken ist die Verkipfung besonders effizient zu erzeugen.

Werden bei einer translatorischen Verschiebung die Ladungen mit einer schnellen Periodizität aufgebracht (Wechselspannung), so wird der Spiegel periodisch translatiert. Die Translation eines Laser-Resonatorspiegels führt aber wie bekannt zu einer Frequenzänderung des Lasers und eine schnelle periodische Translation auch zu einer schnellen Frequenzmodulation.

Durch Verkipfung kann der Spiegel entweder so justiert werden, daß der optimale Arbeitspunkt des Lasersystems eingestellt wird — was eine geringere Anforderung an die Montagegenauigkeit erlaubt — oder der Spiegel wird periodisch so verkippt, daß der Laser vom optimalen Arbeitspunkt durch Dejustage des Spiegels ausgeschaltet wird. Wird dies mit geeigneter Periodizität und geeignetem Taktverhältnis durchgeführt, so führt dies zum bekannten Phänomen der Riesenpulserzeugung des Lasers (Güte- oder Q-Schaltung).

Die hier beschriebenen Spiegel werden ätztechnisch so ausgestaltet, daß der optisch aktive Bereich an dünnen Biegebalken aus Silizium- oder einem geeigneten Dünnsfilm frei beweglich aufgehängt wird. Aus Integrierbarkeitsgründen bietet es sich an, zur Krafteinleitung die Elektrostatik zu verwenden. Dabei wird das Siliziumsubstrat elektrisch kontaktiert, so daß der Spie-

gel eine Elektrode einer Kondensatoranordnung darstellt. Diese Einheit wird mit einem zweiten Siliziumsubstrat verbunden, in das eine durchgehende Öffnung zur Transmission des Laserstrahls hineingearbeitet ist. Ferner ist eine flache Vertiefung vorgesehen, die den Elektrodenabstand zum beweglichen Teil und damit auch die Bewegungsfreiheit des Spiegels festlegt. Innerhalb dieser Vertiefung sind Kondensator-Gegenelektroden aufgebracht. Diese zwei Substrate werden durch geeignete Verfahren — wie beispielsweise anodisches Bonden oder Si-Si-Bonden — miteinander verbunden. Durch Anlegen einer äußeren Spannung an die Elektroden wird der Spiegel elektrostatisch bewegt. Neben der Elektrostatik können auch andere Kraftprinzipien eingesetzt werden, z. B. die Piezoelektrik oder die Magnetik. Dazu kann ein entsprechend kleines Stallelement oder ein Dauermagnet der Spiegelanordnung zugefügt werden.

Die Fig. 7 zeigt eine bevorzugte Ausführungsform einer Anordnung, bei welcher zweidimensionale Arrays von Lasersystemen mit mikromechanisch manipulierbaren Spiegeln hergestellt werden. Um das System nicht unnötig komplex darzustellen, wird lediglich ein Array von Halbleiter-Laserdioden mit mikromechanisch manipulierbaren Spiegeln betrachtet. In analoger Weise können jedoch auch von Laserdioden gepumpte Festkörperlaser hergestellt werden.

In dieser dargestellten Ausführungsform werden Arrays von mikromechanisch manipulierbaren Laserspiegeln 160 aus einem Siliziumsubstrat geätzt und entsprechend optisch beschichtet, so daß über die Siliziumwaferoberfläche verteilt eine zweidimensionale Anordnung von Spiegeln in regelmäßigen Abständen mit entsprechenden Ansteuerlementen entsteht. Hierbei können auch die Spiegel und die Spiegelansteuerung aus zwei Siliziumwafern gefertigt sein, welche miteinander kontaktiert werden, so daß die Spiegelansteuerung jeweils exakt zu den Spiegelementen positioniert ist. Der Wafer 150 — versehen mit einer dielektrischen Beschichtung 120 — wird exakt positioniert in Relation zu einem zweiten Wafer 110, auf welchem sich in ebenso regelmäßigen Abständen eine zweidimensionale Arrayanordnung von Laserdioden 140 und Strahlumlenkelementen 130 befindet. Dieser Wafer 110 kann beispielsweise aus Silizium bestehen, in welches die Strahlumlenkelemente 140 geätzt und mit einer reflektierenden Spiegelschicht 170 versehen sind, und auf welchem die zumeist auf GaAs-Basis hergestellten Dioden 130 entsprechend exakt montiert sind. Der Wafer 110 kann aber auch aus einer monolithischen GaAs-Anordnung bestehen, in welcher die Laserdioden entsprechend strukturiert und geätzt sind, ebenso wie die Strahlumlenkelemente 140. Dieser Wafer 110 ist nun seinerseits verbunden mit einer Kühleinheit 100, welche z. B. aus auf Siliziumbasis hergestellten Mikrokanalkühlern besteht. Die parallel zur Waferfläche 110 emittierte Strahlung der Laserdioden wird nun über die Strahlumlenkelemente 140 so umgelenkt, daß sie senkrecht zur Waferoberfläche des Wafers 150 auf die mikromechanisch bewegbaren Spiegel fällt, von dort teilweise in sich reflektiert wird, teilweise als Laserstrahlung 170 senkrecht zur Spiegelfläche austritt.

Eine solche Anordnung ermöglicht die zweidimensionale Arrayausbildung von einzelnen, beispielsweise in der Frequenz abstimmbaren Laserdioden, aber auch von einzelnen in der Amplitude oder in der Frequenz schnell modulierbaren Laserdioden, gütegeschalteten Laserdioden oder die entsprechende Kontrolle von Am-

plitude, Frequenz oder Güte von mit Laserdioden gepumpten Festkörperlasern. Die Fertigung ist problemlos mit herkömmlicher Batchtechnologie gegeben, da lediglich mehrere Wafer in bekannter Weise geätzt und strukturiert werden müssen, welche anschließend als Ganzes gegeneinander positioniert und verbunden werden. Eine Einzeljustage oder Einzelverbindung von Elementen entfällt hier.

#### Patentansprüche

1. Lasersystem mit einem oder mehreren aktiv kontrollierten Laserspiegeln, die durch elektrostriktive Materialien, wie Piezokeramiken bewegt werden, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserspiegel des Lasersystems jeweils durch ein auf der Basis der Mikrosystemtechnik hergestelltem und aus einem Halbleitermaterial geformten Element gebildet werden, welches mit dem Verfahren der Halbleiter-Strukturierung (Ätztechnik) zum einen als Aktuator ausgebildet und zum anderen mittels optischer Beschichtungstechnik (dielektrische oder Metallfilm-Beschichtung) zu einem das Lasersystem in seinen Emissionseigenschaften kontrollierbaren Spiegelement geformt ist.
2. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der aktiv kontrollierte Laserspiegel mit einem freischwebenden Spiegelcoating versehen ist.
3. Lasersystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der aktiv kontrollierte Laserspiegel aus einem Verbund von Halbleiterelementen und optisch beschichteten Spiegelsubstratelementen gebildet wird.
4. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das aktiv kontrollierte Spiegelement zur Modulation der Laser-Emissionsfrequenz mit einer longitudinal gerichteten Bewegung beaufschlagt wird.
5. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das aktiv kontrollierte Spiegelement zur Erzeugung von Riesenimpulsen (Q-switching) mit einer Kippbewegung beaufschlagt wird.
6. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das aktiv kontrollierte Spiegelement relativ zum Lasersystem mittels einer komplexen Bewegung justiert oder das Lasersystem in seiner Amplitude moduliert wird.
7. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß eine ein- oder zweidimensionale Anordnung von in einem Halbleitermaterial monolithisch strukturierten oder auf einem Halbleitermaterial hybride aufgebrachten, mit Strahlumenkeinheiten versehene Laserdioden einer ein- oder zweidimensionalen Laserspiegelanordnung gegenüber positioniert sind, so daß sich in seiner Gesamtheit eine ein- oder zweidimensionale Anordnung von Laserdioden mit zumindest einem externen Laserspiegel je Laserdiode ergibt.
8. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserspiegeleinheit (20, 160) fest mit der Einheit der Laserdioden (1, 130) verbunden ist und in Größe und Anzahl der Lasersysteme beliebig aufgeteilt werden kann.
9. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß eine ein- oder zweidimensionale Anordnung von auf einem Halbleiter-

material hybride aufgebrachten Laserdioden (20, 130) oder Koppelloptiken und Festkörper-Laserkristallen, welche mit Strahlumenkeinheiten (140) versehen sind, einer ein- oder zweidimensionalen Anordnung von Laserspiegeln gegebenübergestellt ist, so daß sich in seiner Gesamtheit eine ein- oder zweidimensionale Anordnung von durch Laserdioden gepumpten Festkörperlasern mit zumindest einem externen Laserspiegel je Laserdiode ergibt.

10. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß das die Laserdioden tragende Halbleitersubstrat (100) mit Kühlkanälen (101) zur Temperaturkonstanthaltung der wärmeerzeugenden Laserdioden (130) versehen ist, oder das Substrat mit einem weiteren, mit Kühlkanälen versehenen Halbleitersubstrat verbunden ist.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

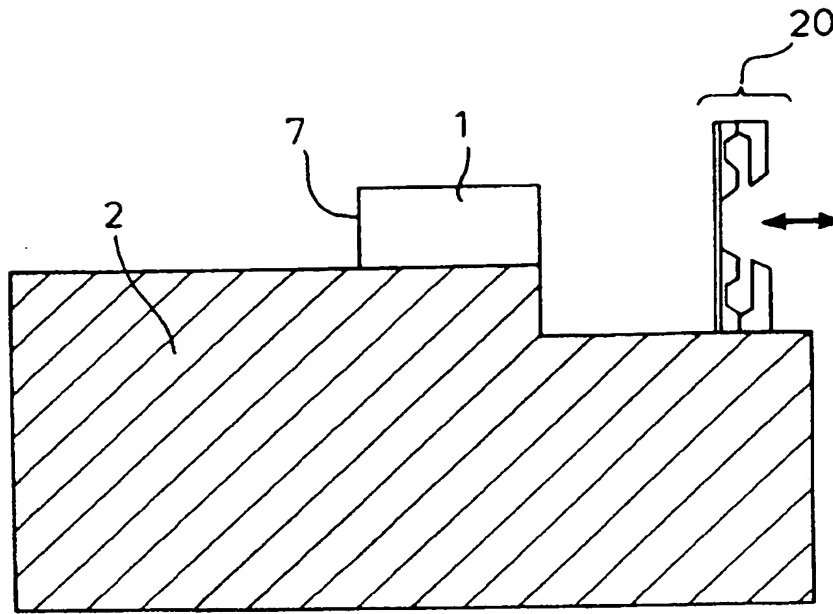


FIG. 1

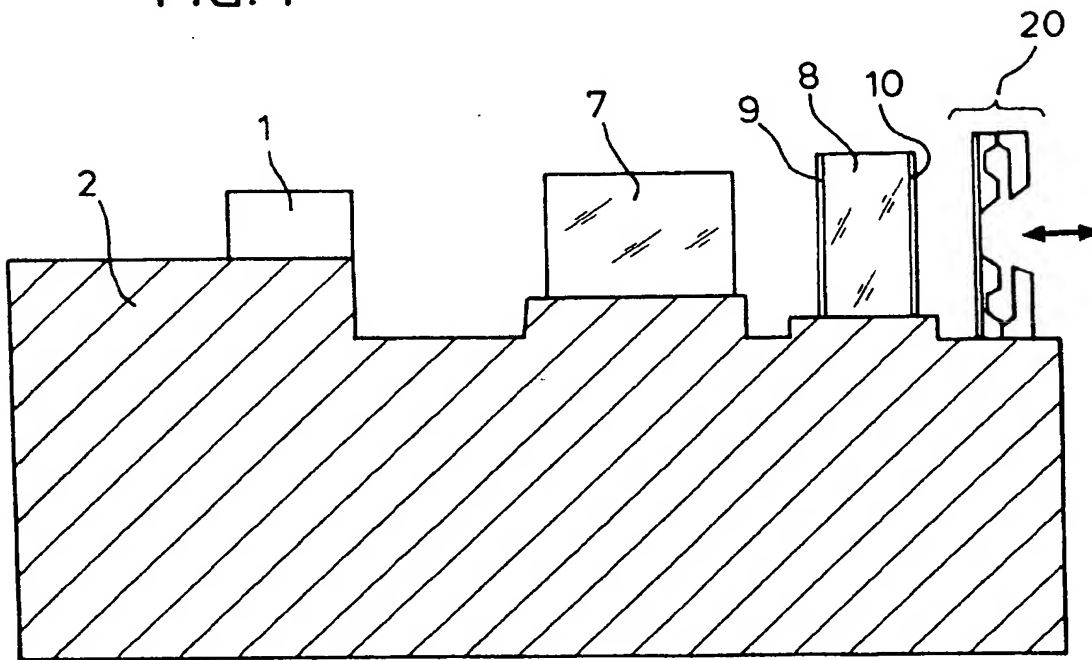


FIG. 2

